

OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

⑪ Número de publicación: **2 112 780**

⑫ Número de solicitud: 9502382

⑬ Int. Cl.<sup>6</sup>: G01N 3/32

⑭

PATENTE DE INVENCION

B1

⑮ Fecha de presentación: **01.12.95**⑯ Fecha de publicación de la solicitud: **01.04.98**Fecha de concesión: **20.10.98**⑰ Fecha de anuncio de la concesión: **16.12.98**⑱ Fecha de publicación del folleto de patente:  
**16.12.98**⑲ Titular/es: **Consejo Superior de  
Investigaciones Científicas  
Serrano 117  
28006 Madrid, ES**⑳ Inventor/es: **Campos Pozuelo, Cleofe;  
Gallego Juárez, Juan Antonio;  
Sanz Sánchez, Pedro Tomás y  
Montoya Vitini, Fausto**㉑ Agente: **No consta**㉒ Título: **Procedimiento y dispositivo para la caracterización elástica no lineal de materiales sólidos.**

㉓ Resumen:

Procedimiento y dispositivo para la caracterización elástica no lineal de materiales sólidos. El objeto de esta patente es el establecimiento de un procedimiento de medida y un dispositivo experimental que permite la caracterización no lineal de materiales mediante la medida de su parámetro de no linealidad. El procedimiento se caracteriza porque las medidas se hacen con muestras en resonancia y el parámetro de no linealidad se deduce de la generación de armónicos. El dispositivo experimental está constituido por un sistema de excitación, un sistema de adquisición de datos y las muestras resonantes del material. El sistema de excitación se compone de un transductor piezoeléctrico de potencia excitado por un generador electrónico que incluye un circuito de seguimiento de la frecuencia y otro para el control de tiempo de excitación. El sistema de adquisición de datos consiste en un captador de vibraciones y un termómetro no intrusivos. Las muestras son barras cilíndricas resonantes de sección escalonada con las que se consigue una gran concentración de energía, lo que permite alcanzar el rango no lineal con excitación lineal.

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el artº 37.3.8 LP.

Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. C/Panamá, 1 – 28036 Madrid

ES 2 112 780 B1

## DESCRIPCION

Procedimiento y dispositivo para la caracterización elástica no lineal de materiales sólidos.

### Sector de la técnica

Caracterización de materiales por ultrasonidos.

### Estado de la técnica

La caracterización no lineal de materiales sólidos es hoy en día un problema tecnológico de gran relevancia. Como es bien sabido, la vibración de sólidos elásticos se puede describir mediante leyes lineales solo en el caso de amplitudes infinitesimales. De hecho, si la vibración es de amplitud finita, las ecuaciones del movimiento son no lineales y el sólido debe caracterizarse por medio de constantes elásticas de orden mayor de dos. Existen distintos fenómenos en los que, en condiciones reales, se tienen grandes amplitudes de desplazamiento y, por lo tanto, se hace imprescindible una caracterización no lineal de los materiales involucrados. Como ejemplos podemos citar la propagación de ondas sísmicas en rocas, las exploraciones geofísicas y los procesos industriales en los que intervienen ondas sónicas y ultrasónicas de alta intensidad. Los procedimientos acústicos clásicos para el estudio de las propiedades elásticas de los sólidos en condiciones lineales se basan en la medida de velocidad y atenuación. El procedimiento de medida a aplicar depende del rango de frecuencia de interés. Para frecuencias por debajo de los 100 kHz el método usual es excitar un modo resonante en una muestra del material y medir la frecuencia y curvas de resonancia. Para frecuencias más altas, son más apropiados los métodos pulsados ya que las dimensiones de muestras que se requerirían para tener resonancia serían demasiado pequeñas. Los métodos para caracterizar los sólidos en el rango no lineal no están tan bien establecidos. De hecho el estudio de comportamiento no lineal de sólidos es relativamente reciente habiendo crecido en los últimos años como una consecuencia de distintos problemas prácticos tales como la propagación de ondas sísmicas en rocas o la creciente potencia utilizada en aplicaciones sónicas y ultrasónicas donde las características no lineales de los sólidos no pueden ignorarse. Los procedimientos propuestos hasta ahora para la caracterización no lineal se pueden dividir en dos grandes grupos. El primer procedimiento general consiste en la aplicación de una tensión estática (hidrostática o uniaxial) de gran magnitud y en la medida del tiempo que necesita una onda de baja amplitud para recorrer la muestra. La pendiente de la velocidad en función de la tensión estática aplicada está relacionada con los coeficientes elásticos de segundo y tercer orden y, en definitiva, con el parámetro de no linealidad. El otro método existente consiste en la generación de una onda sinusoidal de volumen en la frontera de una muestra del material en estudio y medida de la distorsión de la onda a lo largo de la trayectoria de propagación. Las propiedades elásticas no lineales del medio se infieren del crecimiento de los armónicos generados. Así, mientras el primer método requiere altas tensiones estáticas, el segundo exige altas frecuencias ultrasónicas (del orden de los megaciclos) para

poder cumplir la condición de ondas de volumen progresivas. Resulta pues evidente que existe un vacío en el rango de las altas frecuencias sónicas y las bajas frecuencias ultrasónicas (del orden de los kilociclos) en lo que se refiere a la caracterización no lineal de materiales sólidos y que consecuentemente con los procedimientos clásicos de caracterización elástica lineal y las longitudes de onda correspondientes a estas frecuencias en sólidos debe utilizarse un procedimiento en resonancia.

### Descripción de la invención

El objeto de esta patente es el establecimiento de un procedimiento de medida y un dispositivo experimental que permita la caracterización no lineal de un medio sólido mediante la medida de su parámetro de no linealidad. El parámetro de no linealidad,  $\beta$ , de un medio se define como la relación entre el coeficiente del término no lineal y el lineal en la ecuación de ondas de segundo orden, es decir es una relación entre constantes elásticas de tercer y segundo orden que caracteriza el comportamiento no lineal del medio.

El principio del procedimiento se basa en la medida de las componentes de primer y segundo orden de la onda estacionaria de amplitud finita (generada con excitación sinusoidal) para diferentes amplitudes de vibración. Para calcular el valor del parámetro de no linealidad a partir de dicha medida se ha desarrollado un modelo teórico, según el cual la amplitud del segundo armónico viene dada por la expresión.

$$u(x) = u^2 \beta b(x) \quad (1)$$

siendo  $b(x) = \cos kx + 2j \sin kx - \cos 2kx - j \sin 2kx + j 2x/l \sin 2kx$ ,  $l$ , longitud de la barra,  $k$ , el número de onda y  $u_1$ , la amplitud de vibración de la señal de excitación que se supone sinusoidal.

Por lo tanto, conocida la posición del punto de medida,  $(x)$  y la intensidad de la excitación sinusoidal ( $u_1$ ), el valor del parámetro de no linealidad  $\beta$  puede derivarse de la medida de la amplitud del segundo armónico, según la ecuación (1). De acuerdo con la ecuación (1) al aumentar la amplitud de excitación, el segundo armónico crece de forma parabólica, dependiendo el coeficiente de dicha parábola del valor del parámetro de no linealidad y del punto de medida. En la Figura 1 se muestra la evolución de la amplitud del segundo armónico de la velocidad de vibración en  $m/s$  (eje S) con la amplitud de excitación en  $m/s$  (eje E) calculada para una barra cilíndrica resonante, en el punto central de la misma (a) y en un punto situado en una coordenada  $x=5l/8$  (b). El procedimiento que aquí se propone se basa en la medida de dichas parábolas y la obtención del parámetro de no linealidad a partir del coeficiente de las mismas.

El dispositivo experimental consta básicamente de un sistema de excitación de las muestras y un sistema de adquisición de datos. El dispositivo completo se muestra en la figura 2.

El sistema de excitación consiste en un generador electrónico (1) y un transductor piezoeléctrico (2). El generador electrónico utilizado para excitar el transductor, que consta de un oscilador (3) y un amplificador de potencia (4), está dotado de un sistema realimentado (5) para aju-

tar automáticamente la frecuencia de excitación a la de resonancia del transductor. El sistema cuenta además con un circuito de interrupción (6) diseñado para producir cortes periódicos en la señal de excitación, de esta forma se puede controlar el tiempo de excitación de forma que la temperatura de la muestra permanezca constante. Este circuito de interrupción consiste esencialmente en un contador programable y una etapa de salida que actúa sobre la señal de entrada del amplificador de potencia. El tiempo de excitación puede variarse entre 1.5 s y 9.6 s y el tiempo de parada entre 1.5 s y 180 s. Con estos rangos es posible mantener constante la temperatura para muestras metálicas sometidas a grandes deformaciones. Además el dispositivo consta de una red de resistencias eléctricas (7) que adaptan el generador a la carga, situada a la salida del generador electrónico, con lo que se incrementa la anchura de la banda eléctrica y, por lo tanto, se aumenta la estabilidad del sistema.

El transductor de excitación (2), que es un sistema resonante a la frecuencia de interés, está constituido por dos elementos resonantes, un elemento transductor piezoeléctrico (8) y un amplificador mecánico de forma escalonada (9) (Figura 2).

La geometría de las muestras utilizadas es fundamental para el éxito del sistema de caracterización. Se utilizan muestras cilíndricas de perfil escalonado (10) como se muestra en las Figuras 2 y 3. En la Figura 3 se presenta la amplitud de deformación (eje D) en el transductor (16) y en una probeta (17) con relación de diámetros  $d_1/d_2=2$  (el eje L representa la coordenada espacial en m). Puede verse que con este tipo de geometrías se consiguen deformaciones muy altas en el material sin grandes amplitudes de excitación, es decir, con el transductor de excitación funcionando en la gama lineal. Las muestras se construyen de forma que sean resonantes a la frecuencia del transductor. Puede comprobarse que la condición de resonancia para este tipo de geometrías es  $\tan(\omega l/4c) = d_2/d_1$ , donde  $\omega$  es la frecuencia de resonancia,  $l$ , la longitud de la muestra,  $c$ , la velocidad del sonido, y  $d_2$  y  $d_1$  los diámetros de las dos secciones de la barra. Puede verse que, debido a la especial geometría de las muestras, las longitudes de resonancia son menores de media longitud de onda, lo que redundará en una mayor concentración de la energía y, por lo tanto, como ya se ha dicho, en altas amplitudes de deformación.

El procedimiento de medida se basa en la comparación con el modelo teórico antes mencionado, de las amplitudes del fundamental y del segundo armónico. Por tratarse de una caracterización no lineal, la vibración longitudinal debe medirse directamente y no puede deducirse de un barrido transversal sobre la muestra. Por esta razón las muestras se construyen con una serie de pequeñas pestañas prismáticas (11) (Figura 2), de dimensiones del orden de 50 veces menores que la longitud de onda en el material, repartidas a lo largo de las muestras y que permiten la medida directa de la vibración longitudinal en diferentes puntos. Las dimensiones transversales de las pestañas deben elegirse de forma que no presenten modos flexionales cercanos a la frecuencia de trabajo.

Debido al pequeño tamaño de las pestañas con respecto a la longitud de onda de la vibración no afectan ni a la impedancia ni a la frecuencia de resonancia de la muestra. De esta forma las pestañas vibran solidariamente con la probeta.

Todas las medidas de caracterización del material se realizan por debajo del umbral de comportamiento no lineal del transductor, es decir, bajo condiciones de excitación lineal. Esto significa que la amplitud del segundo armónico en los extremos de la muestra debe ser nula. Las muestras vibran, sin embargo, de forma no lineal gracias al gran aumento de la deformación que se produce debido a su geometría, presentando amplitud notable de segundo armónico tan sólo en su zona central donde se deberán realizar las medidas de evolución del segundo armónico.

El sistema de adquisición de datos tiene como característica fundamental la utilización de métodos no intrusivos. Esta particularidad es imprescindible para la caracterización del material en condiciones reales de trabajo, es decir, con altas amplitudes de vibración, donde cualquier contacto provocaría grandes calentamientos locales, con los consiguientes gradientes de temperatura que afectarían grandemente las características en estudio del material. Así la amplitud de desplazamiento se mide mediante un vibrómetro basado en un interferómetro láser de He-Ne (12). El vibrómetro mide frecuencias de hasta 1.5 MHz y velocidades de vibración entre  $10 \mu\text{m/s}$  y  $10 \text{ m/s}$ . El vibrómetro se conecta a un osciloscopio digital (13) y este a un PC (14) donde se almacenan y analizan las señales por métodos standard de FFT. La temperatura se mide mediante un termómetro de infrarrojos (15) que tampoco presenta puntos de contacto. La temperatura se mide en el nodo de vibración de la muestra que es el punto de máximo calentamiento y no se permiten en dicho punto, calentamientos mayores o iguales a  $1^\circ\text{C}$ .

Se recogen señales en un punto de la muestra para diferentes niveles de excitación, se miden las amplitudes del fundamental y del segundo armónico para cada nivel de excitación y se obtiene así, experimentalmente la parábola antes mencionada, cuyo coeficiente determina el valor del parámetro de no linealidad.

A modo de ejemplo se presenta la caracterización no lineal de una aleación de titanio ( $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ ) comúnmente utilizada en transductores ultrasónicos de potencia. La caracterización se ha llevado a cabo utilizando una probeta escalonada resonante de dicho material con relación de diámetros 1,6. El valor del parámetro de no linealidad obtenido para vibración extensional es  $\beta=28$ . En la Figura (el eje F representa la amplitud del fundamental en  $\text{m/s}$  y el eje S la amplitud del segundo armónico en  $\text{m/s}$ ) se presentan con el signo (○) las parábolas obtenidas experimentalmente en dos puntos diferentes de dicha probeta y con la línea continua las parábolas teóricas. El ajuste se obtiene para un parámetro de no linealidad  $\beta=28$ .

#### Descripción de las figuras

Figura 1. Evolución de la amplitud del segundo armónico de la velocidad de vibración en función de la amplitud de excitación.

Figura 2. Dispositivo experimental.

Figura 3. Distribución de la amplitud de deformación,

Figura 4. Comparación teórico - experimental de la amplitud del segundo armónico en función del fundamental.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento y dispositivo para la caracterización no lineal de materiales sólidos **caracterizado** porque las medidas se realizan en resonancia en la gama de las bajas frecuencias ultrasónicas o las altas frecuencias sónicas y el parámetro de no linealidad se deduce de la evolución con la amplitud de excitación del segundo armónico en la zona central de las probetas.

2. Procedimiento y dispositivo para la caracterización no lineal de materiales sólidos según reivindicación 1 y **caracterizado** por la utilización de probetas cilíndricas de sección escalonada, resonantes a la frecuencia de interés y dotadas de un número de pequeñas pestañas repartidas a lo

largo de su longitud que permiten la medida directa de la vibración longitudinal.

3. Procedimiento y dispositivo para la caracterización no lineal de materiales sólidos según reivindicaciones 1 y 2 y **caracterizado** por la utilización de un sistema electrónico de excitación dotado de un dispositivo electrónico para seguimiento de la frecuencia de resonancia y de un circuito de interrupción periódica de la señal.

4. Procedimiento y dispositivo para la caracterización no lineal de materiales sólidos según reivindicaciones anteriores y **caracterizado** porque el sistema de captación de vibración y medida de la temperatura en la muestra no presentan puntos de contacto.

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

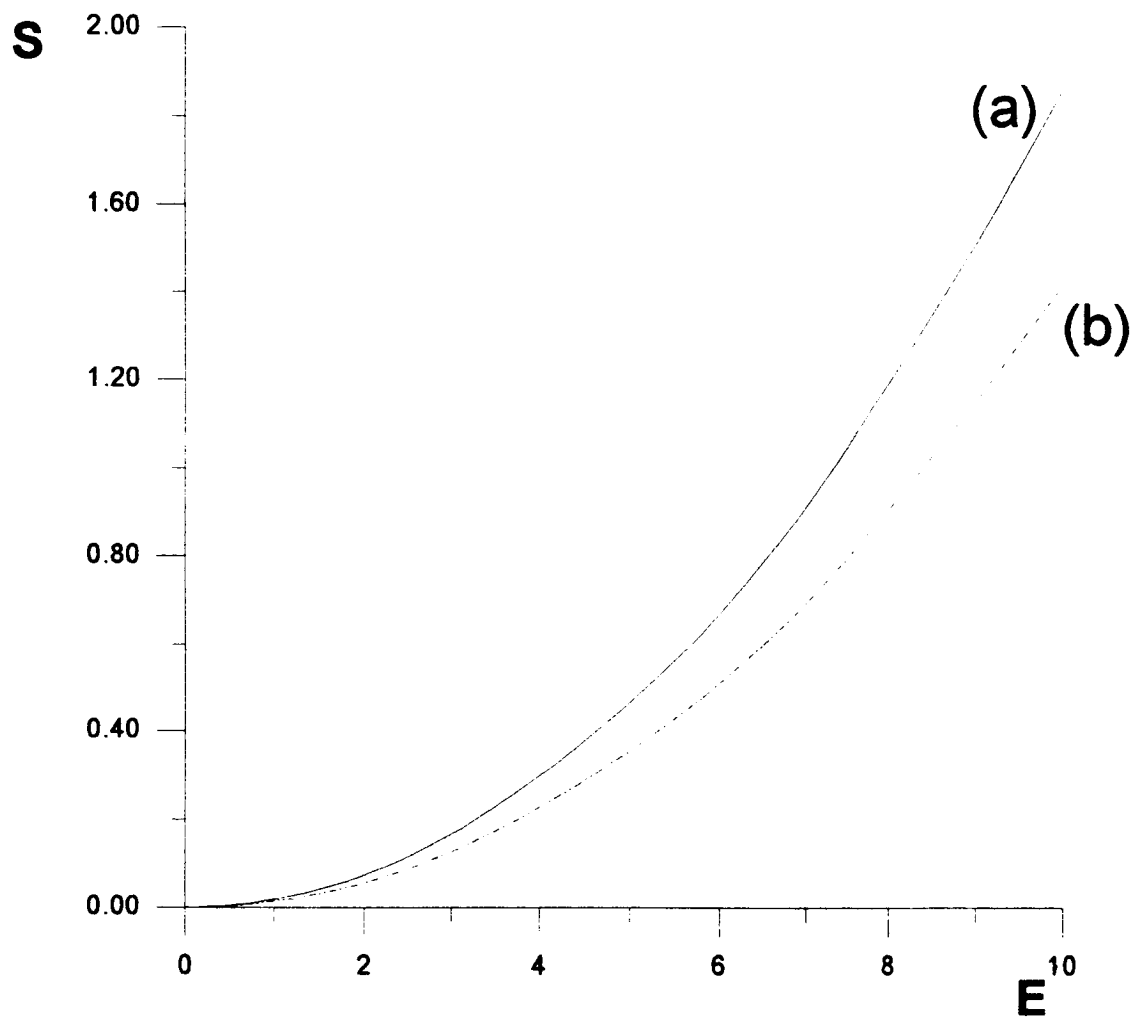


Figura 1

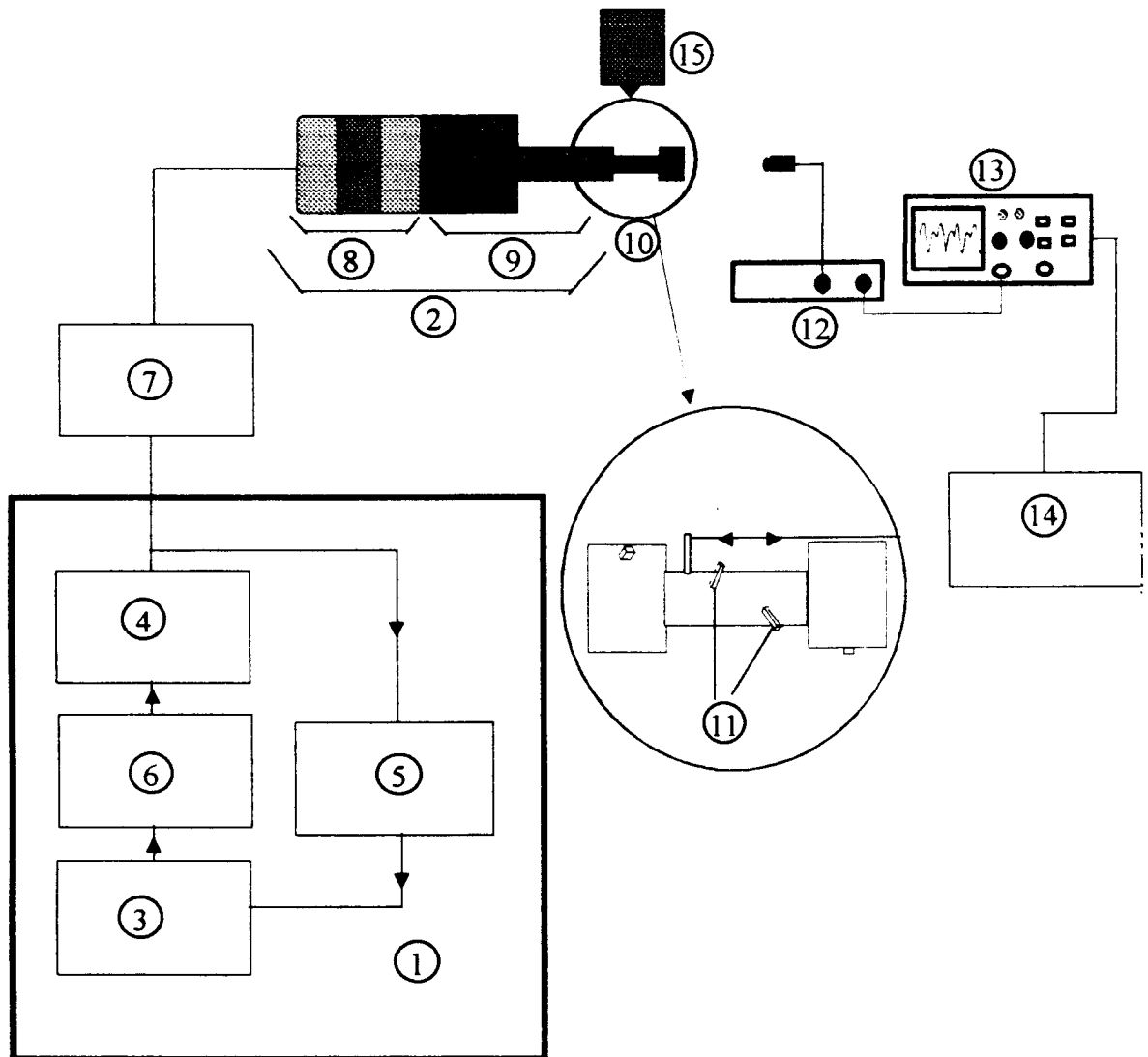


Figura 2

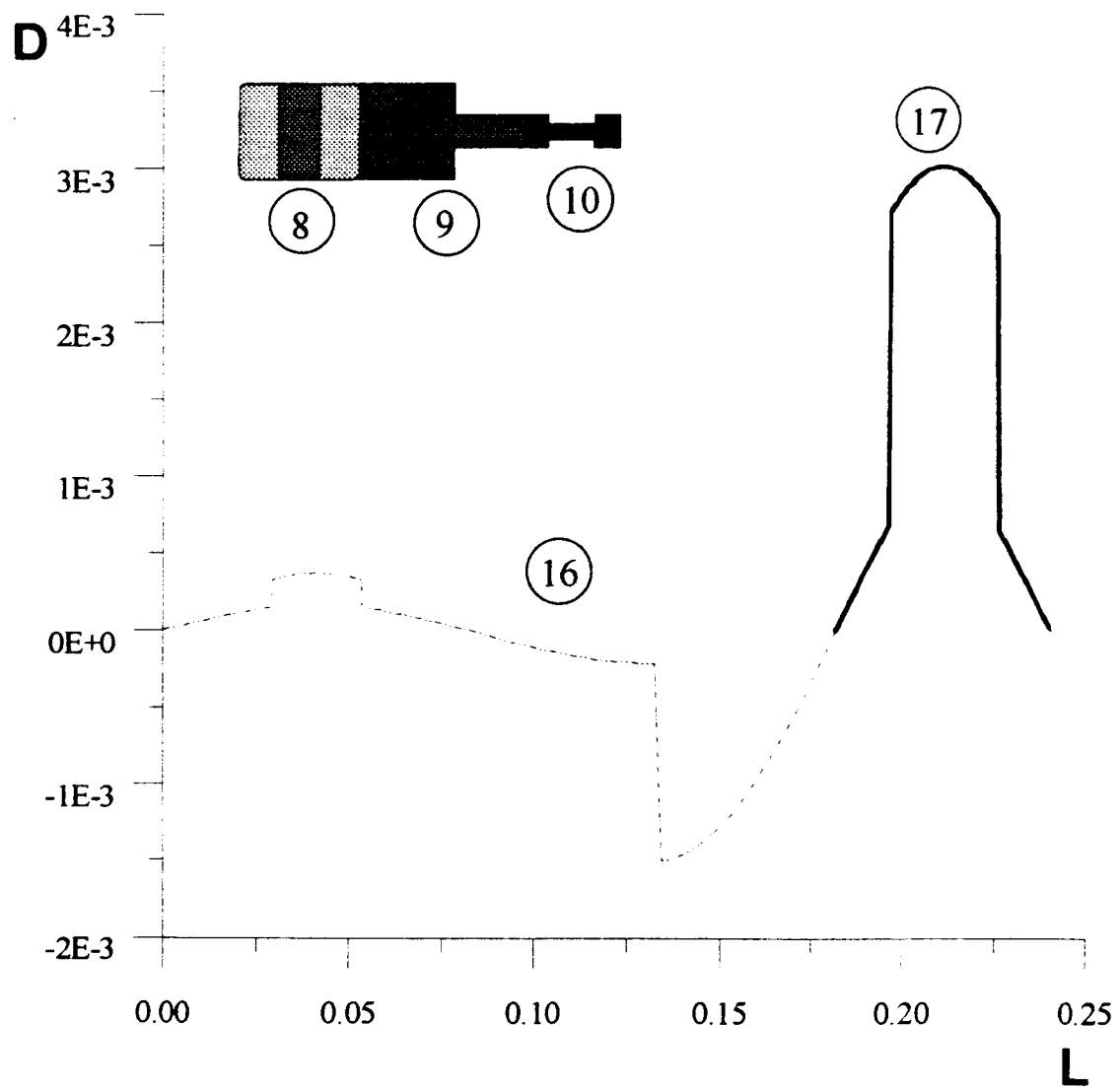


Figura 3



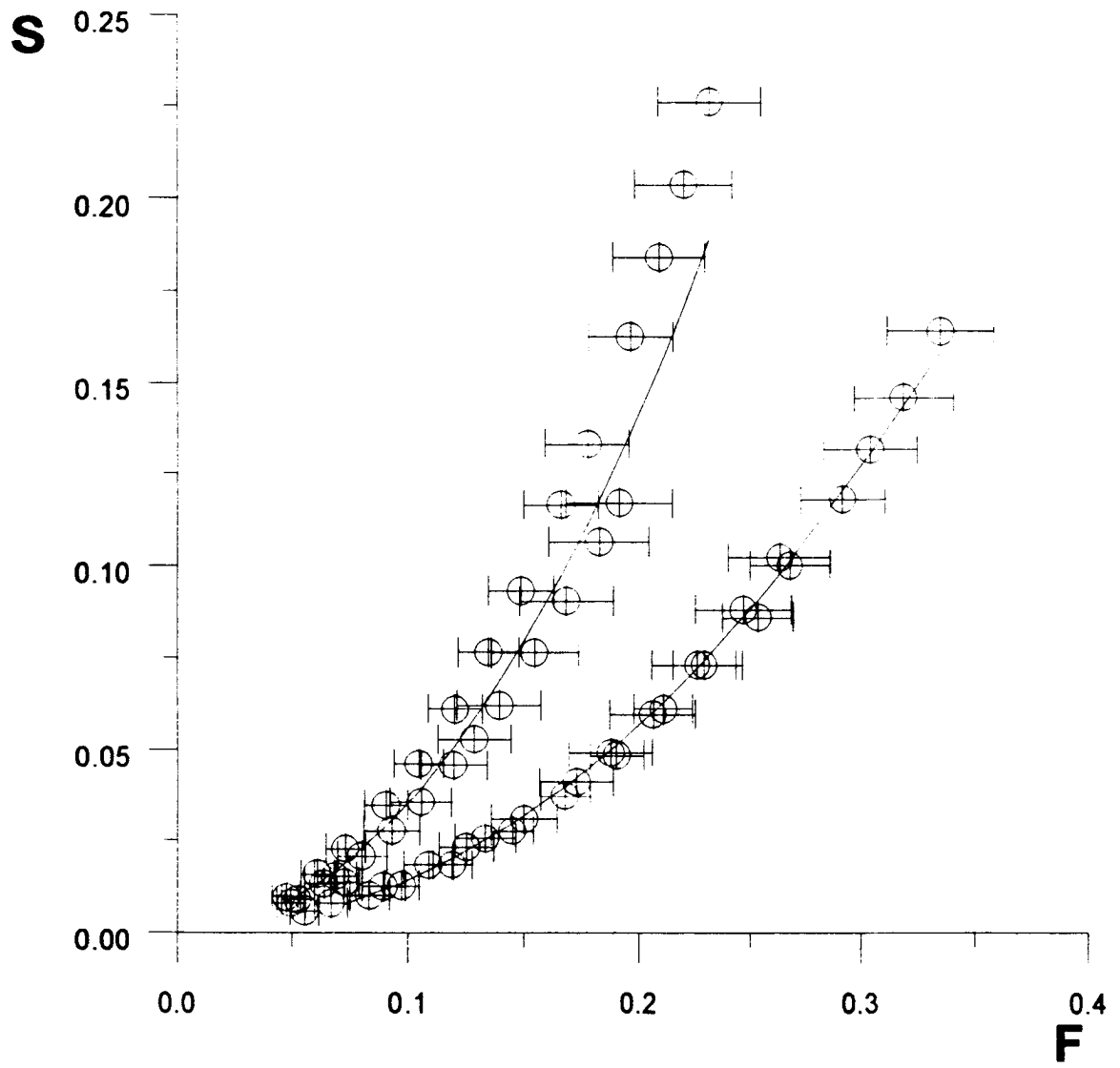


Figura 4



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS  
ESPAÑA

- ⑪ ES 2 112 780  
⑫ N.º solicitud: 9502382  
⑬ Fecha de presentación de la solicitud: 01.12.95  
⑭ Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑮ Int. Cl.<sup>6</sup>: G01N 3/32

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	FR-2680003-A (BATHIAS CLAUDE y otros) 05.02.93 * Página 2; página 5, líneas 15-17; figura 1 *	1-4
A	BASE DE DATOS PAJ en EPOQUE. Japanese Patent Information Organisation (Tokio, JP) JP-58211627-A (MITSUBISHI JUKOGYO KK) 09.12.83 * Resumen *	1-3
A	GB-2060179-A (CARL SCHENCK AG) 29.04.81 * Columnas 1,2 *	1,2
A	US-4446733-A (SHIGEO OKUBO) 08.05.84 * Columna 2, líneas 33-58 *	1,3
A	FR-2520874-A (LABORATOIRE DE MÉCANIQUE PHYSIQUE y UNIVERSIDAD DE BURDEOS) 05.08.83 * Reivindicaciones 1,12 *	1,4

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones n.º:

Fecha de realización del informe

23.02.98

Examinador

S. Fernández Díez-Picazo

Página

1/1